

## СЕКЦИЯ 4. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ И МАТЕРИАЛОВ

### ВЛИЯНИЕ ТВЕРДОРАСТВОРНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И УСТАЛОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT1-0

*Труш В.С.*

*Руководитель - член-корреспондент НАН Украины, д.т.н. Федирко В.Н.*

Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины,

г. Львов, Украина

tvsl981@list.ru

Титановые сплавы широко применяются как конструкционные материалы в химической промышленности, машиностроении, космической и авиационной технике. Однако некоторые природные физико-механические свойства (повышенная реакционная способность к взаимодействию с кислородом и азотом, низкий уровень усталостной прочности и долговечности) сужают спектр их использования. Одним из путей повышения работоспособности изделий из титановых сплавов является упрочнение поверхностных слоев металла различными методами.

В Физико-механическом институте им. Г.В. Карпенко НАН Украины предложена концепция инженерии поверхности титановых сплавов термодиффузионными методами. В рамках данной концепции разработан способ повышения усталостной прочности и долговечности  $\alpha$ - и псевдо- $\alpha$ -сплавов титана путем регламентированного твердорастворного упрочнения (РТУ) поверхностного слоя металла из разреженной контролируемой кислородосодержащей газовой среды.

Цель данной работы - установить влияние РТУ поверхности на прочностные и усталостные характеристики титанового сплава VT1-0.

Для этого на образцах из сплава VT1-0 термодиффузионными методами были сформированы поверхностные газонасыщенные слои глубиной 30...60 мкм с разным уровнем упрочнения  $100 \% > K > 5 \%$ , который определяли по величине относительного прироста твердости поверхности  $K = ((H^s_\mu - H^c_\mu)/H^c_\mu) \cdot 100 \%$ , где:  $H^s_\mu$  - твердость поверхности;  $H^c_\mu$  - твердость сердцевины металла. Затем образцы подвергали испытаниям на прочность и усталость по различным схемам нагружения.

Для испытаний на изгиб с вращением и циклическое растяжение применяли цилиндрические образцы диаметром рабочей части 3,8 мм и 3 мм соответственно, а на малоцикловый чистый изгиб - плоские образцы с шириной рабочей части 3 мм, толщиной 1 мм. Испытание на замедленное

разрушение проводили на плоских образцах шириной 4 мм с V-образным концентратором глубиной 0,5 мм.

Согласно полученным результатам, РТУ в исследованном диапазоне не значительно влияет на кратковременную прочность  $\sigma_b$  и относительное удлинение  $\delta$  сплава BT1-0 - изменение этих параметров относительно исходного не упрочненного состояния не превышает  $\pm 4\%$  (рис. 1).

Усталостные характеристики более чувствительны к РТУ. С увеличением уровня РТУ  $K$  от 5 % до 50 %, предел усталости  $\sigma_{-1}$  сплава BT1-0 при испытаниях на изгиб с вращением возрастает от 250 МПа до 275 МПа. Максимального значения  $\sigma_{-1} = 310$  МПа предел усталости достигает при  $K = 70\%$ . При дальнейшем упрочнении до  $K = 90\%$  наблюдается снижение  $\sigma_{-1}$  до 280 МПа (рис. 2). Таким образом, наибольший относительный прирост предела усталости  $\Delta\sigma_{-1}$ , составляющий 35...38 %, для сплава BT1-0 достигнут при уровне упрочнения  $K = 70\%$ .

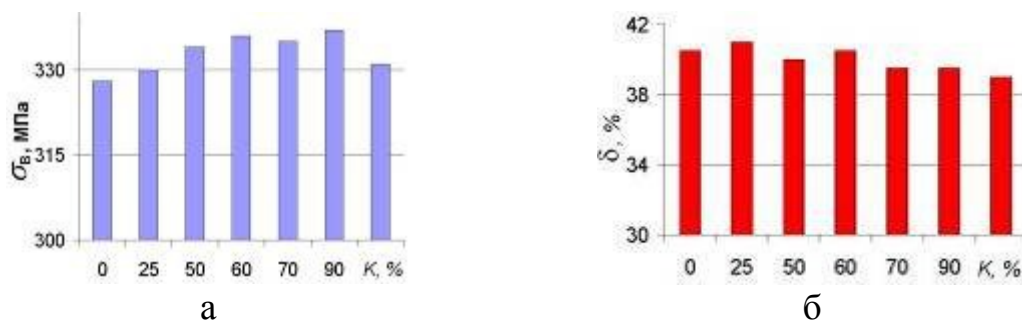


Рисунок 1. Зависимость кратковременной прочности  $\sigma_b$  (а) и относительного удлинения  $\delta$  (б) титанового сплава BT1-0 от уровня РТУ поверхности  $K$  при глубине упрочненной зоны 45...50 мкм)

При испытаниях на малоцикловый чистый изгиб РТУ повышает усталостную долговечность титанового сплава BT1-0 на ~10...15 % (рис. 3). При циклическом растяжении образцов сплава BT1-0 ( $\sigma_a = 250$  МПа), упрочненных на  $K = 40...50\%$ , количество циклов до разрушения возрастает на 100...120 % относительно исходного состояния (рис. 4).

Выявлено, что РТУ положительно влияет на свойства сплава BT1-0 при замедленном разрушении под статической нагрузкой. Так разрушающие напряжения для образцов с упрочненным на оптимальный уровень поверхностным слоем на 1000 ч базе испытаний возрастают на 7...10 %, т.е. такие образцы менее склонны к замедленному разрушению (рис. 5).

Согласно результатам рентгеновских исследований для всех уровней упрочнения образцов сплава BT1-0 характерны: деформация

кристаллической решетки; измельчение субзеренной структуры; изменение знака сжимающих напряжений - по сравнению с исходным состоянием. Однако упрочнение на оптимальный уровень ( $K = 70 \%$ ,  $l = 30 \text{ мкм}$ ), способствует: наибольшей деформации кристаллической решетки металла; максимальному измельчению его субзеренной структуры; достижению наивысшего уровня сжимающих напряжений.

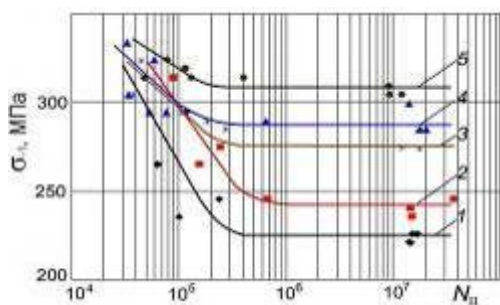


Рисунок 2. Кривые усталости (изгиб с вращением) сплава ВТ1-0 после РТУ: 1 – исходное состояние  $K = 5 \%$ ;  $l = 5 \text{ мкм}$ ; 2 –  $25 \%$ ;  $30 \text{ мкм}$ ; 3 –  $90 \%$ ;  $30 \text{ мкм}$ ; 4 –  $50 \%$ ;  $30 \text{ мкм}$ ; 5 –  $70 \%$ ;  $30 \text{ мкм}$

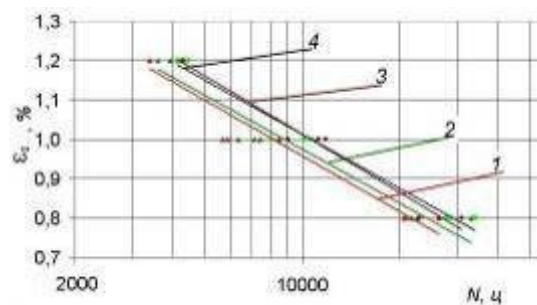


Рисунок 3. Кривые долговечности (малоцикловой чистый изгиб) сплава ВТ1-0 после РТУ: 1 – исходное состояние  $K = 5 \%$ ; 2 –  $K = 42 \%$ ; 3 –  $93 \%$ ;  $30 \text{ мкм}$ ; 4 –  $110 \%$

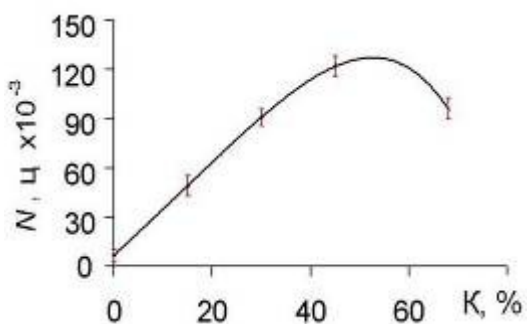


Рисунок 4. Зависимость количества циклов до разрушения сплава ВТ1-0 от уровня поверхностного упрочнения при циклическом растяжении ( $\sigma_a = 340 \text{ МПа}$ )

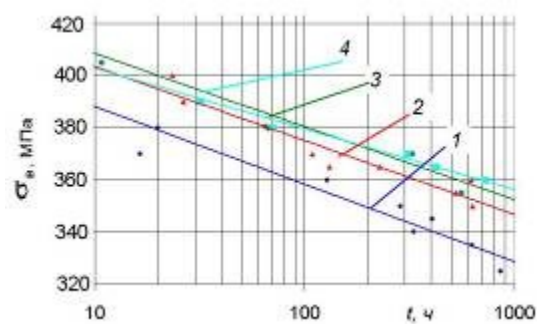


Рисунок 5. Зависимость разрушающих напряжений от времени их действия при испытаниях на статическое растяжение сплава ВТ1-0 после РТУ: 1 -  $K = 5 \%$ , 2 –  $K = 42 \%$ , 3 -  $K = 93 \%$ , 4 -  $K = 110 \%$

Таким образом, РТУ термодиффузионным насыщением из газовой среды, практически не меняя прочность и пластичность титанового сплава ВТ1-0, можно достигнуть существенного повышения его усталостных

характеристик при разных условиях нагружения и уменьшить склонность сплава к замедленному разрушению: при изгибе с вращением - предел усталости  $\sigma_{-1}$  возрастает на 35...38 %; при малоцикловом чистом изгибе усталостная долговечность увеличивается на ~ 10...15 %; при циклическом растяжении ( $\sigma_a = 0,75 \sigma_B$ ) - максимальное количество циклов до разрушения растет на 100...120 % относительно исходного состояния; максимальный прирост разрушающего напряжения при замедленном разрушении под статической нагрузкой на базе 1000 ч составляет 7...10 %.

Необходимо также заметить, что метод РТУ термодиффузионным насыщением имеет ряд весомых преимуществ перед другими методами: возможность совмещать операции упрочнения поверхности изделий со штатной вакуумной термообработкой; обрабатывать изделия сложной формы без изменения их геометрии и размеров; расширить границы эксплуатационной пригодности изделий с газонасыщенными слоями; позволяет реализовать одновременно поверхностную и объемную обработку и может быть рекомендован как заключительная технологическая операция.